

断層近傍地震動に対する残留変位比に関する検討

渡邊 学歩¹・木島 健²・川島 一彦³

¹正会員 博士(工) 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京目黒区大岡山2-12-1)

²学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

³F会員 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

1. はじめに

橋梁構造物が強震動を受けた場合に、構造部材が弾性状態にあるように設計することは、経済性や使用性の制約上困難である。このため、非線形領域での構造部材の変形性能を十分に確保した上で、構造部材の非線形化に伴う橋梁構造物に作用する地震力の低減、応答変位の増大を考慮して行う耐震設計法が、国際的にも広く採用されている^{1),2),3)}。

橋梁構造物に強震動が作用し、構造部材の変形特性に強い非線形性が生じると、地震後に残留変位として塑性変形が残る可能性がある。実際に、1995年の兵庫県南部地震では、阪神高速道路の高架橋が大きな曲げ損傷を受けながらも構造物の倒壊は免れたが、大きな残留変位が生じる被害が、残留変位により1度以上の残留傾斜が生じた橋脚に生じると、その橋脚は地震後に復旧することができず、撤去新設されたことが報告されている^{4),5)}。阿部らは、兵庫県南部地震による高架道路橋の詳細な被害調査から、多くのRC単中式橋脚で残留傾斜が発生していること、外観から判断される橋脚の損傷度が軽微であっても大きな残留傾斜が生じた橋脚があったこと、残留傾斜は地震動の卓越方向に一致していることを示している⁴⁾。幸左らは、橋脚に生じた残留変位を詳細に分析し、橋脚基部の損傷による回転変位によって、橋脚に大きな残留変位が生じたことを示している²⁾。また、上部構造重量による偏心曲げモーメントが橋脚基部に作用するような橋梁構造物では、橋軸直角方向の残留変位と偏心量の間に相関があることを示している³⁾。このような背景により、残留変位は構造物の地震後の復旧可能性を表す重要な指標

となっている。

構造物に強震動が作用した場合に生じる残留変位については、非線形解析が盛んに行われるようになった1970年代から知られている⁶⁾。しかし、橋梁構造物の地震後の復旧可能性という視点にたち、地震後に生じる残留変位について解析を行ったのは川島、MacRaeらである^{7),8),9)}。可能最大残留変位という概念を用いた残留変位比応答スペクトルの提案を行っており、この結果は、1996年以降我が国の道路橋耐震設計の規定に導入されている。星隈らはRC橋脚の非線形履歴特性をTakeda型剛性劣化型モデルを用いて、RC橋脚に生じる残留変位について検討を行っている¹⁰⁾。解析モデルの材料非線形性にTakeda型剛性劣化型モデルを仮定すると、Bilinear型完全弾塑性モデルを仮定した場合の残留変位比の平均値0.6に比べて、残留変位比が0.2まで低減することを明らかにしている。

このように、橋梁構造物の耐震設計においては地震後の残留変位を考慮した設計がなされている。しかし、実際に構造物に生じる残留変位は、地震動の強度および位相特性の複雑さ、構造物の固有周期、構造部材の非線形履歴特性に応じて変化し、その変動幅は非常に大きい。また、残留変位の発生に大きな影響を及ぼす要因について、十分な検討がなされているとはいえず、どのような地震動が残留変位に対して大きな影響を与えるのかについては検討されていないなどの課題が残されている。本研究では強震動、特に断層近傍地震動を受ける構造物に生じる残留変位に関して解析を行ったので、その結果について報告する。

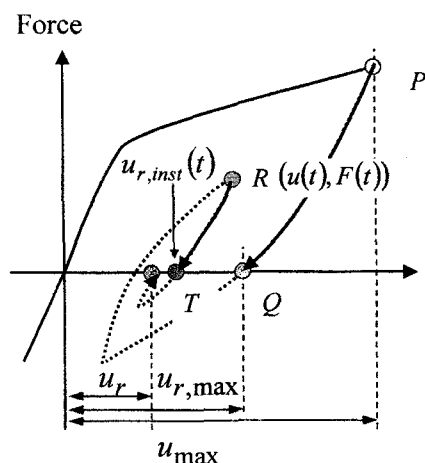


図-1 強震動が作用した場合の非線形履歴特性

2. 残留変位と残留変位比

橋梁構造物を非線形履歴特性を考慮した1自由度系でモデル化し、強震動が作用した場合の地震時応答履歴を例に示すと図-1のようになる。強震動の作用に伴う構造系の変形が非線形域に達し（点P）、ここから除荷が始まると荷重が0（点Q）となっても構造物には塑性変形が残留する。この点の変位は、最大変位からの除荷履歴パスPQ上の残留変位であることから可能最大残留変位 $u_{r,max}$ と呼ぶ。また、任意の履歴上の点Rから除荷された場合の点Tの変位を瞬間残留変位 $u_{r,inst}(t)$ と定義する。

$$u_{r,inst}(t) = u(t) - \int F(s)/k(s) ds \quad (1)$$

ここで、 F は復元力を、 k は任意の変位 s における剛性を表している。なお、積分区間は任意の時刻における変位 $u(t)$ から、この点を通る除荷パス上で復元力が0となる変位である。なお、可能最大残留変位 $u_{r,max}$ は瞬間残留変位の最大値であり、残留変位 u_r は次式の通り振動応答が収束する時刻での瞬間残留変位の値に等しい。

$$\begin{aligned} u_{r,max} &= \max(u_{r,inst}(t)) \\ u_r &= u_{r,inst}(t = \infty) \end{aligned} \quad (2)$$

Bilinear型1自由度系モデルを用いて、1995年兵庫県南部地震による神戸海洋気象台記録(NS成分)に対して、構造物の最大応答変位じん性率が4程度となる地震時応答を再現すると図-2のようになる。同図は応答変位の時刻歴応答を示したものであるが、残留変位がどのように推移するのかを調べるために、瞬間残留変位 $u_{r,inst}(t)$ の時刻歴も併せて示す。

固有周期1.5秒の場合を例にとると、入力地震動

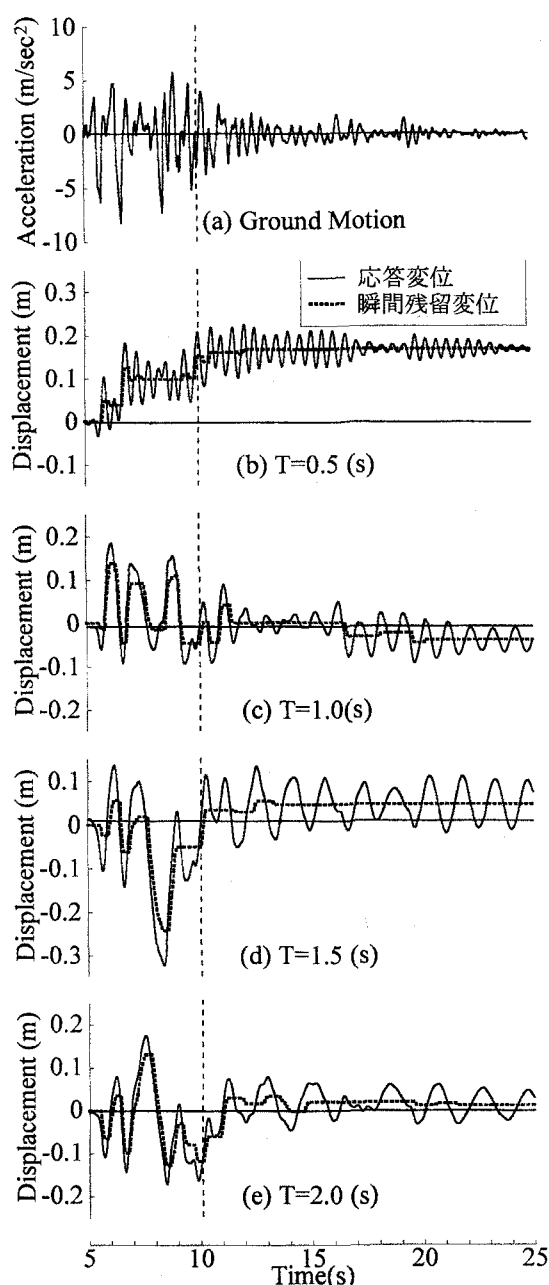


図-2 JMA 神戸記録に対する地震時応答変位と残留変位の時刻歴 ($\mu_T=4$)

が大きくなる5秒付近から徐々に応答が大きくなり、8.4秒で応答変位は負側でピーク $u_{max} = -0.32m$ を迎える。同時に、瞬間残留変位 $u_{r,inst}(t)$ は $-0.24m$ まで増加しピークとなることから、可能最大残留変位 $u_{r,max}$ は $0.24m$ となる。

入力地震動が卓越する5秒～10秒にかけて、応答変位 $u(t)$ の増大に伴い $u_{r,inst}(t)$ が変化しているが、10秒以降では概ね一定となる。異なる固有周期の構造系であっても同様な傾向が見られるが、具体的にどのパルス状の地震力が $u_{r,inst}(t)$ の変化に大きな影響を及ぼすかは、構造物の固有周期に依存している。10秒以降では応答変位は正側にシフトすると共に、

徐々に応答が収束し地震動終了後には残留変位は $u_r = 0.047\text{m}$ となる。これは $u_{r,\max}$ の20%程度に相当し、この可能最大残留変位 $u_{r,\max}$ に対する残留変位 u_r の割合を示したものが、次式で定義される残留変位比 r_r である。

$$r_r = \left| \frac{u_r}{u_{r,\max}} \right| \quad (3)$$

同様に、固有周期が0.5秒、1秒および2秒の場合には、残留変位比 r_r はそれぞれ1.0、0.28および0.095となり、残留変位比 r_r は同一入力地震動、目標じん性率の場合であっても固有周期によって変化する。このように、実際に生じる残留変位が可能最大残留変位 $u_{r,\max}$ よりも小さいのは、構造系が最大応答変位を経験した後も振動を続け、その除荷・再载荷の過程において瞬間残留変位が増加・減少を繰り返すためである。

3. 履歴特性の違いが残留変位に及ぼす影響

地震動の作用によって、構造物に生じる残留変位は図-2に示したように構造物の固有周期によって大きく変化するだけでなく、履歴特性の違いによって大きく変化する。ここでは、履歴特性の違いが構造物に生じる残留変位に及ぼす影響を検討するために、図-3に示すような、地震動に含まれる単一のパルス成分が卓越するような地震動が構造物に作用した場合に、Bilinear型およびTakeda型の履歴特性の異なる構造系で残留変位の発生にどのような違いが発生するか検討を行う。

3.1 Takeda型モデルの残留変位低減メカニズム

構造物の上部構造質量が1000t、固有周期1.0秒、降伏変位が0.005mの非線形1自由度系の構造物に、図-3に示した地震動が作用した場合の非線形減衰振動応答を図-4に示す。降伏耐力と骨格曲線が等しいために、両構造系には、図-4(1)(a)に示すように、一様に最大応答変位 $u_{\max} = 0.036\text{m}$ (図-4(1)(a)の点(b))が生じる。このとき、応答じん性率は $\mu = 7.2$ である。その後、Bilinear型の履歴を有する構造系の応答では、直線状の除荷パス履歴を描く。しかし、減衰の効果によって復元力応答は負側では降伏耐力 $-F_y$ に達しない。このため、復元力応答履歴は直線上を振動しながら減衰し点(e)に収束する。このために、残留変位 $u_r = 0.031\text{m}$ は可能最大残留変位 $u_{r,\max}$ と一致し、残留変位比は $r_r = 1$ となる。

一方、Takeda型履歴を有する構造系では除荷剛性が劣化するために、荷重が0となる点(c)での変位

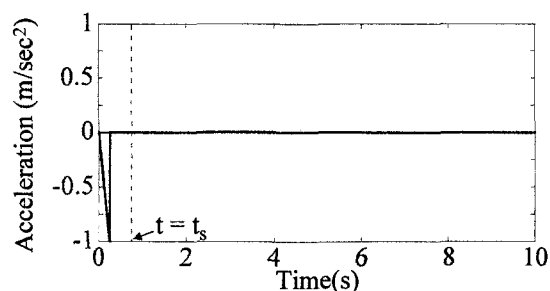
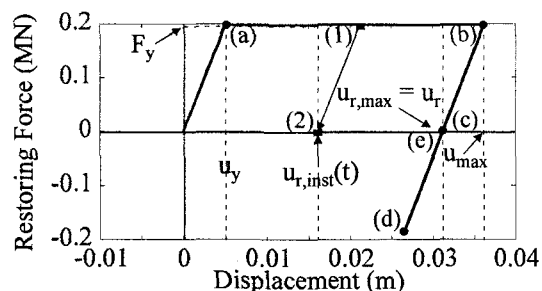
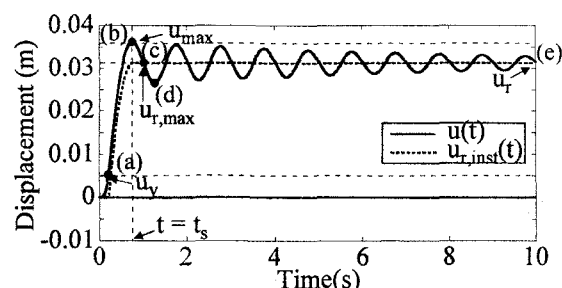


図-3 単一パルス入力地震動

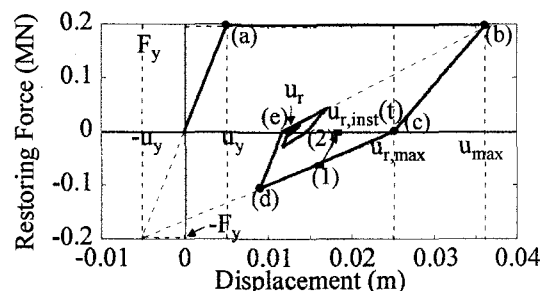


(a) 復元力～水平変位の履歴

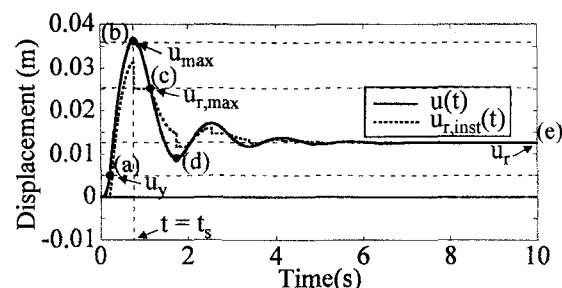


(b) 応答変位および瞬間残留変位

(1) Bilinear型モデル



(a) 復元力～水平変位の履歴



(b) 応答変位および瞬間残留変位

(2) Takeda型モデル

図-4 非線形減衰振動をする場合の残留変位

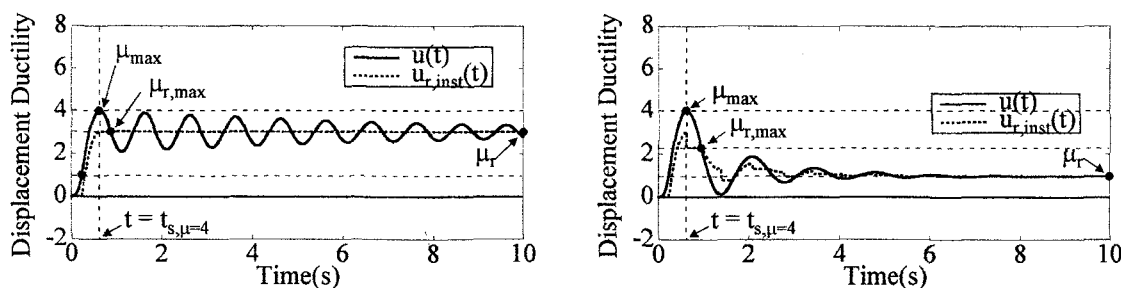


図-5 非線形減衰振動する場合の降伏変位で規格化した応答変位および瞬間残留変位（ $\mu_T=4$ の場合）

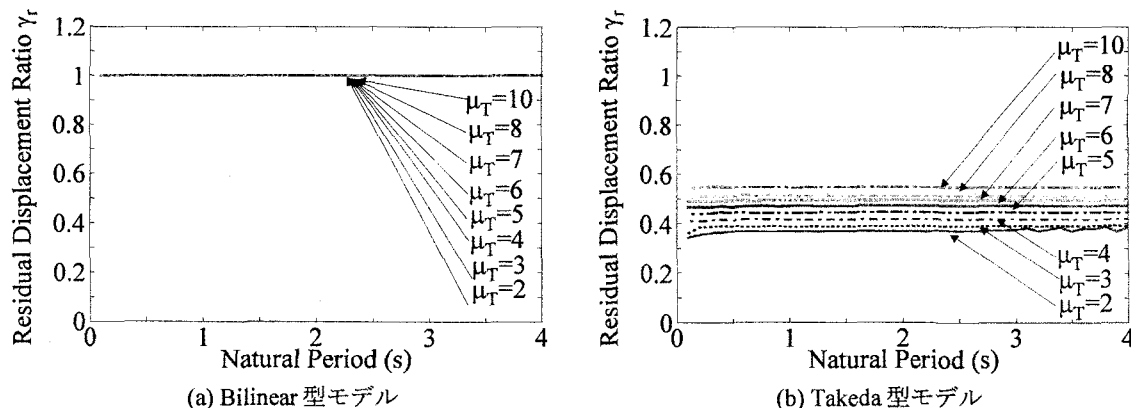


図-6 非線形減衰振動する場合の残留変位比の周期依存性

$u_{r,max} = 0.025m$ が、Bilinear型の可能最大残留変位 $u_{r,max} = 0.031m$ に比べて小さくなる。一方、点(c)に達した後の再載荷履歴は負側の降伏点を目指すように履歴を描くために、再載荷剛性は直前の剛性よりも劣化し、原点に近い履歴をたどり残留変位が低減する。これ以降、徐々に応答は減衰し、点(e)に収束していき、残留変位は $u_r = 0.015m$ となる。このとき、残留変位比は $\gamma_r = 0.6$ であり、Bilinear型の場合に比べて小さくなる。

図-4(b)の時刻歴応答には応答変位 $u(t)$ と瞬間残留変位 $u_{r,inst}(t)$ を示したが、 $u_{r,inst}(t)$ は応答変位 $u(t)$ の増加と共に時刻 $t = t_s$ に至るまで増加し、最大で $u_{r,inst} = 0.031m$ に達する。Bilinear型ではこの後、 $u_{r,inst}$ は時刻によらず一定となる。一方、Takeda型の場合には、前述したようにBilinear型に比べて内側の履歴ループを描くために瞬間残留変位 $u_{r,inst}(t)$ は減少し、最終的に $u_r = 0.015m$ となる。

3.2 単一パルス地震動が卓越する場合の残留変位比

0.1秒から4秒までの様々な固有周期の構造系で履歴特性の違いが残留変位に及ぼす影響を検討する。まず、応答変位じん性率 μ が4に等しくなる場合について同様な検討を行った。図-5には、固有周期1.0秒の場合を例として、Bilinear型およびTakeda型の履歴特性を有する構造系の応答変位を降伏変位で規格化して示す。Takeda型履歴を有する構造物に生

じる残留変位 u_r は、Bilinear型履歴を有する構造物の場合に比べて小さくなる事が分かる。

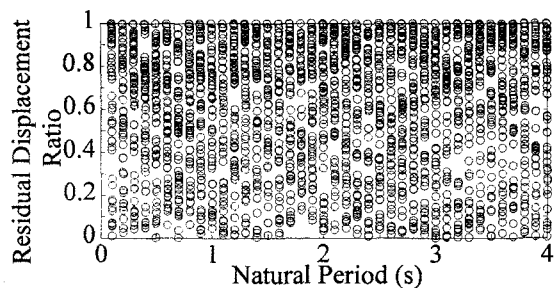
異なる周期の構造系に対する残留変位比 γ_r を示すと図-6の通りとなる。図-3に示した単一パルス波に対しては、構造系に作用する変位の非線形レベルが同程度である場合には、残留変位比 γ_r は周期によらず一定となる。ただし、Takeda型履歴の場合には、構造物の変位じん性率（目標じん性率 μ_T ）が大きくなるにつれて、残留変位比 γ_r は0.36～0.54まで増加する。

4. 断層直近距離が残留変位比に及ぼす影響

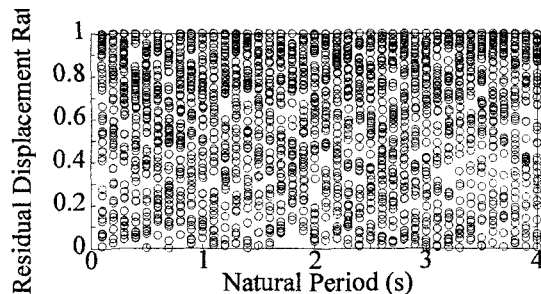
実地震波に対する残留変位の特性を明らかにするために、残留変位比 γ_r を多数の強震記録を基に解析する。履歴特性の影響を解析するために、BilinearモデルとTakeda型モデル¹¹⁾の2種類を用いる。入力地震動としては国内外で観測された150成分の断層近傍地震動を用いることとし、断層直近距離 D_{CF} が10km未満（ $D_{CF} < 10km$ ：60成分）と10km以上40km未満（ $10km \leq D_{CF} < 40km$ ：90成分）の2種類に分類する。

4.1 Bilinear型モデルの場合

$D_{CF} < 10km$ の場合と、10km以上40km未満の場合に分けて、目標じん性率 μ_T が4の場合を対象に残留

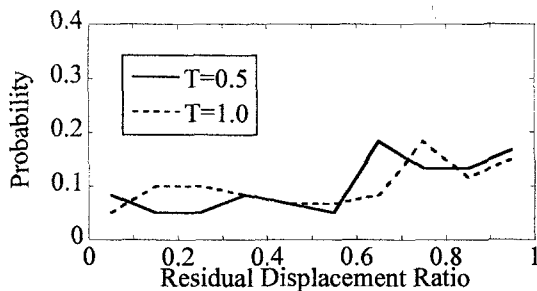


(1) $D_{CF} < 10\text{km}$

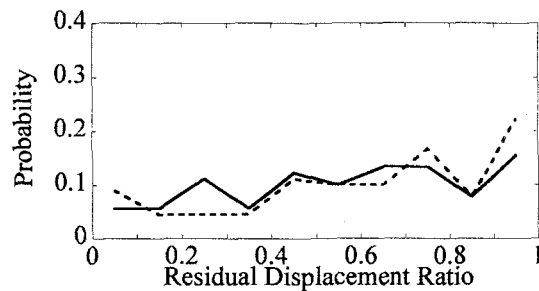


(2) $10\text{km} \leq D_{CF} < 40\text{km}$

図-7 Bilinear型履歴を用いた場合の残留変位比

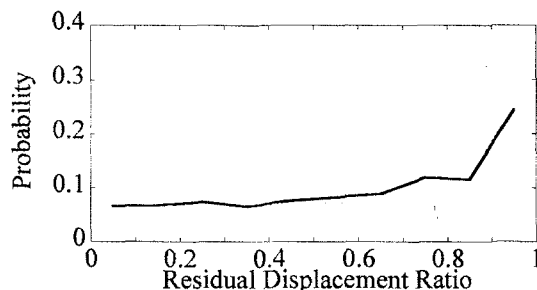


(a) $D_{CF} < 10\text{km}$

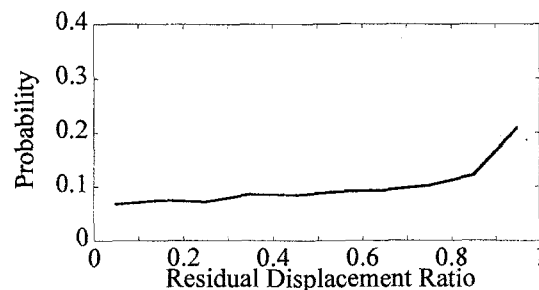


(b) $10\text{km} \leq D_{CF} < 40\text{km}$

図-8 固有周期 0.5 秒および 1 秒の場合の残留変位の確率密度 (Bilinear 型モデル)



(a) $D_{CF} < 10\text{km}$



(b) $10\text{km} \leq D_{CF} < 40\text{km}$

図-9 全周期に対する残留変位の確率密度 (Bilinear 型モデル, 目標じん性率 $\mu_T = 4$ の場合)

変位比 r_r を求めると、図-7 のようになる。上述したように、どの応答変位から除荷し、残留変位が生じるかは地震動や固有周期に応じていろいろな場合があるため、残留変位比 r_r は地震動ごとに非常に大きく変化する。

固有周期 0.5 秒と 1 秒の場合を例に、残留変位比 r_r が a から b の間にある確率密度 $P_r(a \leq r_r < b)$ を次式により定義する。

$$P_r(a \leq r_r < b) = \frac{n(a \leq r_r < b)}{\bar{n}} \quad (4)$$

ここで、 $n(a \leq r_r < b)$ はある固有周期、目標じん性率の場合に、残留変位比 r_r が a から b の間となる地震動の数、 $\bar{n}$ は全地震動の数である。なお、以下の解析では、残留変位比の区間幅を 0.1 とし、 $b = a + 0.1$ とする。

残留変位比 r_r が a から b の間に存在する確率 $P_r(a \leq r_r < b)$ を、図-7 に示した結果から式 (4) により求めると、図-8 のようになる。なお、ここには、後

述する $10\text{km} \leq D_{CF} < 40\text{km}$ の場合についても併せて示す。確率密度 $P_r(a \leq r_r < b)$ は残留変位比 r_r に応じてばらつきが変動するが、全体としては、残留変位比 r_r が大きくなるにつれて増加する傾向がある。ここには示していないが、周期 0.5 秒、1 秒以外の場合においても同様な傾向がある。このため、図-8 に示した確率密度 $P_r(a \leq r_r < b)$ を全周期に対して平均すると図-9 のようになる。 $10\text{km} \leq D_{CF} < 40\text{km}$ の場合についても併せて示す。残留変位比 r_r が大きくなるほど確率密度 $P_r(a \leq r_r < b)$ は漸増し、 $0.9 \leq r_r < 1$ の場合に最大となる。これは、後述する Takeda 剛性劣化型モデルの場合と顕著に異なる点で、Bilinear 型モデルの場合には、残留変位 u_r と最大応答 $u_{\max}$ の相関が非常に高いことを示している。これは、前述したように、Bilinear 型履歴は Takeda 型に比べて残留変位が累積しやすいことを示している。

式 (4) から残留変位比 r_r が b を越さない確率（非超過確率） p_r を

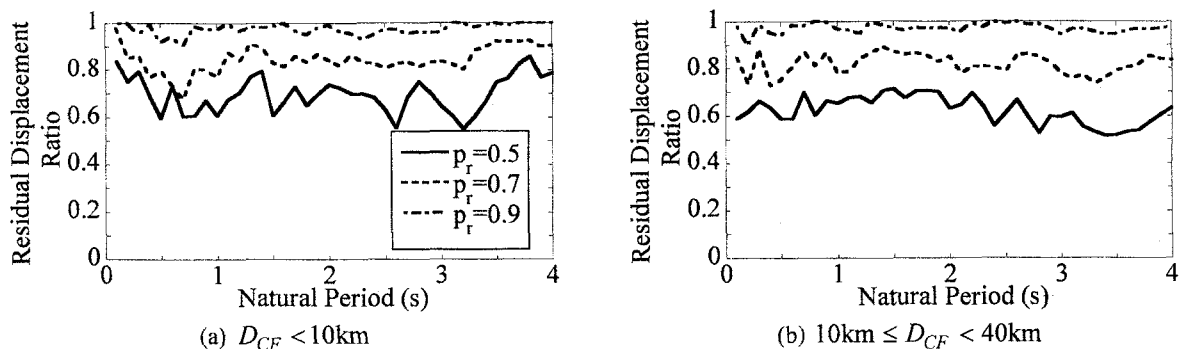


図-10 非超過確率 p_r が 0.5, 0.7 および 0.9 の場合の残留変位比 (Bilinear 型モデル, $\mu_T = 4$)

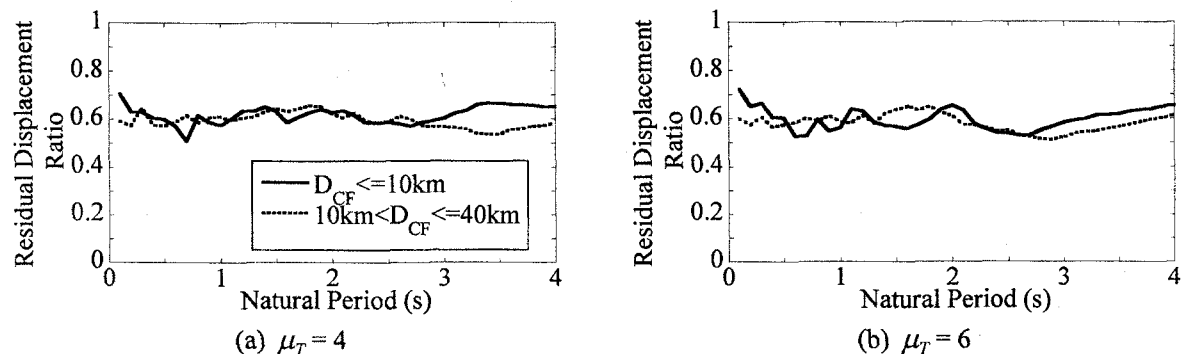


図-11 断層直近距離の違いによる残留変位比の平均値の比較 (Bilinear 型モデル)

$$p_r = 1 - \Pr(b \leq r_r < \infty) \quad (5)$$

と定義すると、非超過確率 p_r が 0.5, 0.7 および 0.9 の場合の残留変位比を求めると図-10 のようになる。0.5 秒以下の固有周期においては、固有周期が短くなるにつれて残留変位比 r_r は 1 に近づく。固有周期によって多少の変動があるが、0.5 秒以上の固有周期の領域では概ね一定値となり、非超過確率 p_r が 0.5, 0.7 および 0.9 の場合にそれぞれ、0.6～0.7, 0.8, 0.95 程度の値となる。

以上は、 $D_{CF} < 10\text{km}$ の場合であるが、同じ解析を $10\text{km} \leq D_{CF} < 40\text{km}$ の場合についても行っている。図-8(b)には固有周期 0.5 秒および 1 秒の場合の式(3)による残留変位比 r_r の確率密度 $P_r(a \leq r_r < b)$ を示したが、結果から、 $D_{CF} < 10\text{km}$ の場合とそれほど大きな差はみられない。図-9(b)に示した全周期に対する平均についても同じく大きな差はみられない。

非超過確率 p_r が 0.5, 0.7 および 0.9 の場合の残留変位比 r_r は図-10(b)に示したとおりである。これを図-10(a)に示した $D_{CF} < 10\text{km}$ の場合と比較すると、 $10\text{km} \leq D_{CF} < 40\text{km}$ の場合には固有周期が 0.5 秒以下で概ね一定の値を示すことを除けば、断層直近距離の違いによる大きな差は見られない。

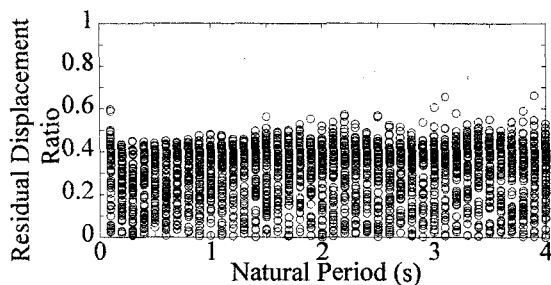
図-11には、断層直近距離の違いによる残留変位

比 r_r の平均値の比較を示す。周期による残留変位の変動は大きくなく、特に一般的な都市高架橋の場合の固有周期帯である 0.5 秒から 1.5 秒程度では、いずれのじん性率に対しても、断層直近距離の違いによらずほぼ 0.6 程度の一定値を示している。この結果は、川島らが 63 成分の地震動記録に基づいて求めた残留変位比の平均値と一致しており、断層近傍地震動が残留変位に及ぼす影響は少ない。

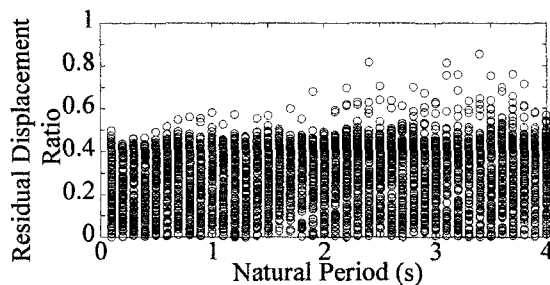
4.2 Takeda 剛性劣化型モデルの場合

図-7に示したBilinear型モデルを用いた場合の残留変位比 r_r を、Takeda型剛性劣化モデルを用いた場合について示すと図-12のようになる。Takeda型剛性劣化モデルを用いた場合の残留変位比 r_r は概ね 0.5 程度以下となっており、明らかに小さくなっている。図-13には式(4)による確率密度 $P_r(a \leq r_r < b)$ を示すが、固有周期 0.5 秒と 1.0 秒とで多少異なるが、残留変位比 r_r が 0.2～0.4 の範囲において $P_r(a \leq r_r < b)$ が卓越する。また、残留変位比 r_r が 0.4 より大きくなると $P_r(a \leq r_r < b)$ は減少し、残留変位比 r_r は 0.6 以上の値になる確率は非常に低い。

図-6に示した単一パルス地震動が卓越するような地震力が作用する場合には、残留変位比 r_r は 0.4 程度であった。これに対して、実際の地震動が作用する場合には 0～0.6 の領域で非常に大きな変動を有し

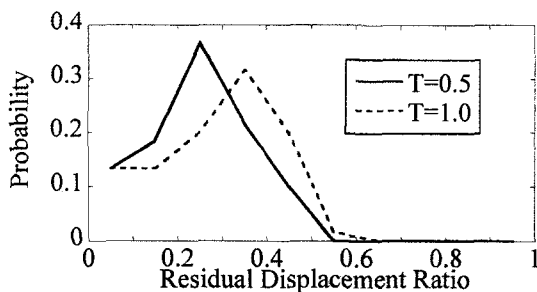


(1) $D_{CF} < 10\text{km}$

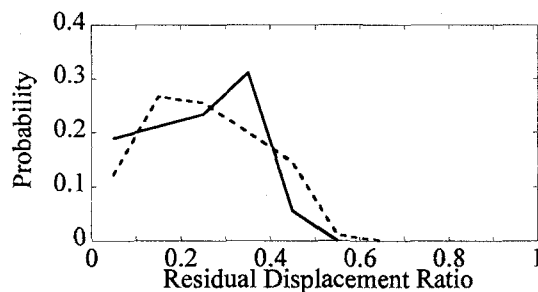


(2) $10\text{km} \leq D_{CF} < 40\text{km}$

図-12 Takeda型モデルを用いた場合の残留変位比

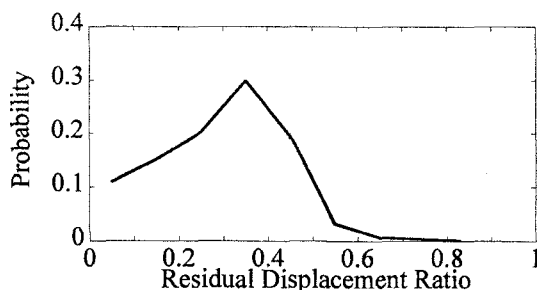


(a) $D_{CF} < 10\text{km}$

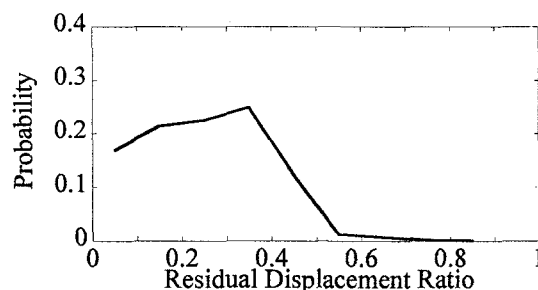


(b) $10\text{km} \leq D_{CF} < 40\text{km}$

図-13 固有周期 0.5 秒および 1 秒の場合の残留変位の確率密度 (Takeda 型モデル)

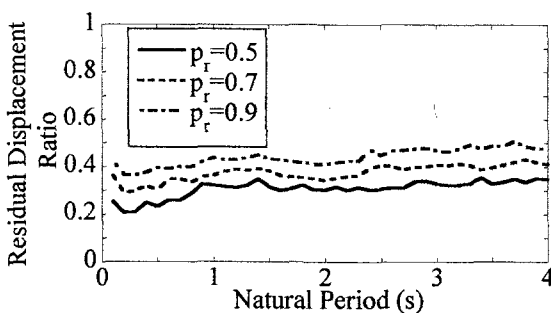


(a) $D_{CF} < 10\text{km}$

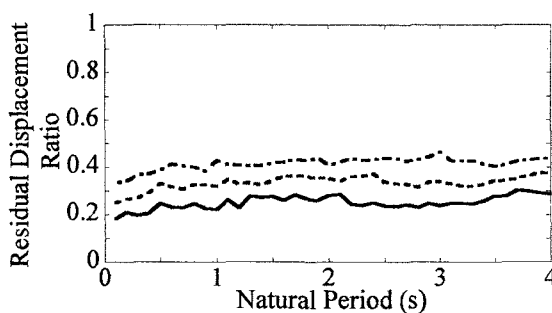


(b) $10\text{km} \leq D_{CF} < 40\text{km}$

図-14 全周期に対する残留変位の確率密度 (Takeda 型モデル)



(a) $D_{CF} < 10\text{km}$



(b) $10\text{km} \leq D_{CF} < 40\text{km}$

図-15 非超過確率 p_r が 0.5, 0.7 および 0.9 の場合の残留変位比 (Takeda 型モデル, $\mu_T = 4$)

ている。これは、2章で示したように複雑な地震力の作用により、構造系が最大応答変位を経験した後も振動を続け、除荷・再載荷の過程において瞬間残留変位が増加・減少を繰り返されるためである。つまり地震動の複雑さが残留変位の変動に大きな影響を及ぼしていることが分かる。

各周期における残留変位比 r_r の平均値を示すと図-14のようになる。 r_r の平均値は周期や目標じん

性率によらず約0.2と一定の値を示しており、この結果は星隈¹⁰⁾らが、63成分の地震動記録に基づいて求めた残留変位比の平均値と一致しており、断層近傍地震動と遠距離地震動の違いが残留変位に及ぼす影響は少ない。式(5)による非超過確率 p_r が0.5, 0.7および0.9の場合にの残留変位比 r_r について求めると、 $D_{CF} < 10\text{km}$ および $10\text{km} \leq D_{CF} < 40\text{km}$ の場合には図-15のようになる。非超過確率 p_r が0.9の場

合には、 $D_{CF} < 10\text{km}$ および $10\text{km} \leq D_{CF} < 40\text{km}$ のいずれの場合においても0.4程度の値を示している。

5. 結論

本研究では、残留変位は性能規定型耐震設計において、復旧可能性を表す重要な指標となっており、断層近傍地震動に対する関心が高まっていることから、断層近傍地震動が、残留変位に及ぼす影響を18地震による150成分の断層近傍地震動に基づき解析した。本解析結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 残留変位および残留変位は同一地震動でも大きく変動し、明確な周期依存性は認められない。
- 2) 多数の地震動記録に対する解析結果から、残留変位比の確率密度分布、平均値および非超過確率が0.5、0.7および0.9の場合の残留変位比を検討した結果、断層直近距離の違いが残留変位比に及ぼす影響はない。
- 3) 弾塑性Bilinear型モデルを用いた場合の残留変位比とTakeda剛性劣化型モデルを用いた場合の比較から、履歴特性の違いが残留変位比に及ぼす影響は大きく、その分布特性に明らかな違いを生じさせる。
- 4) 弾塑性Bilinear型モデルを用いた場合の残留変位比の確率密度分布は概ね様な分布を示すのに対して、Takeda剛性劣化型モデルを用いた場合の残留変位比は0.6以下に集中している。
- 5) 残留変位の平均値は周期によらず概ね一定値を示しており、弾塑性型Bilinear型モデルに対しては0.6程度、Takeda剛性劣化型モデルでは0.4程度となる。
- 6) 残留変位比は正規分布をなしておらず、残留変位比の平均値は必ずしも最も高い生起確率に応じた残留変位比を表していない。荷重ベース静的耐震設計法においては、残留変位比をその分布特性を考慮して適切に設定するべきである。このため、図-10および図-15に示したように非超過確率にもとづいた残留変位比を提案した。

謝辞：本論文で用いた強震記録の利用に際しては、PEER(Pacific Earthquake Research Center)、K-net、COSMOS、台湾中央気象台のWebサイトの強震記録データベースを使用致しました。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，pp.406，2002。
- 2) California Department of Transportation Seismic design criteria Ver. 1.2 California, 2001。
- 3) CEN: European Committee for Standardization: Eurocode8 - Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures - part 1.1: General rules - Seismic actions and general requirements for structures, ENV 1998-2, 1994。
- 4) 阿部哲子，藤野陽三，阿部雅人：1995年兵庫県南部地震による阪神高速高架橋の被害と2，3の分析，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.181-199，1999。
- 5) 幸左賢二，小野紘一，藤井康男，田中克典：被災RC橋脚の残留変位に関する研究，No.627/V-44，pp.193-203，1999。
- 6) 後藤尚男，家村浩和：強震時における1自由度系の塑性変形に関する考察，pp.57-67，土木学会論文報告集，第184号，1970。
- 7) 川島一彦，Gregory A. MacRae，星隈順一，長屋和宏：残留変位応答スペクトルの提案とその適用，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.183-192，1994。
- 8) Kazuhiko Kawashima, Gregory A. MacRae, Jyun-ichi Hoshikuma and Kazuhiro Nagaya: Residual Displacement Response Spectrum, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No.5, pp.523-530, ASCE, 1998。
- 9) Gregory A. MacRae and Kazuhiko Kawashima: Post-Earthquake Residual Displacement of Bilinear Oscillators, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, pp.701-716, 1997。
- 10) 星隈順一，運上茂樹，長屋和宏：耐震設計における鉄筋コンクリート橋脚に生じる残留変位の評価，第5回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.399-404，2002。
- 11) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.96, No.ST12, Paper 7759, pp.2557-2573, 1970。